

# Seguimiento de emisiones a la atmósfera de material pasivo o radiactivo con el modelo MOCAGE/AEMET en modo ACCIDENTE

María Allué Camacho<sup>(1)</sup>, Alberto Cansado Auría<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Agencia Estatal de Meteorología, Servicio de Modelización de la Calidad del Aire,  
C/Leonardo Prieto Castro 8, 28040 Madrid,  
[malluec@aemet.es](mailto:malluec@aemet.es)

## 1. Introducción

MOCAGE es un modelo de transporte químico desarrollado por Météo-France e implementado en AEMET para proporcionar predicciones de calidad del aire. También se ha implementado una versión, que denominamos MOCAGE-ACCIDENTE, en la que el modelo opera como un modelo de dispersión atmosférica. En esta versión, el módulo de química está desactivado y únicamente se tienen en cuenta los mecanismos de transporte (advección, convección y difusión turbulenta) y los de eliminación de especies (deposición seca y húmeda y en su caso, decaimiento radiactivo). Se supone que el material emitido a la atmósfera desde una o varias fuentes es distribuido uniformemente entre dos niveles que se deben especificar y no se tiene en cuenta información adicional sobre otro tipo de emisiones continuas, superficiales o en altura, ya sean naturales o antropogénicas.

Este modo de operación es muy útil para simular la evolución de la nube generada por la emisión a la atmósfera de un contaminante. En AEMET el principal objetivo del uso de MOCAGE-ACCIDENTE es dar apoyo, en este tipo de situaciones, a las instituciones y organismos de la Administración Estatal o de las Comunidades Autónomas. Así mismo, también se hace uso interno de los productos generados a partir del modelo por parte de los predotores para dar apoyo a diversos sectores como el de la aviación, defensa, etc, aunque en algunos de estos casos se trata de una herramienta complementaria a otras herramientas oficiales existentes. Además, las integraciones del modelo en episodios de emisión real de material a la atmósfera proporcionan la oportunidad de comprobar el buen funcionamiento del mismo.

### 1. Configuración de dominios anidados

MOCAGE es un modelo multiescala que puede ser configurado hasta con tres niveles de anidamiento. Puesto que el objetivo principal es dar apoyo a las autoridades en caso de emergencia, en AEMET se han implementado cinco configuraciones distintas de

dominios anidados para dar respuesta con la mayor resolución posible en las áreas de interés para España. La razón por la que se han implementado tantas configuraciones distintas y la elección de las mismas obedece a distintos factores, como la disponibilidad de información meteorológica en las resoluciones y áreas involucradas, la viabilidad computacional y los tiempos de ejecución del modelo. El resultado de las cinco configuraciones son las cuatro áreas de integración de la figura 1 y además un área global de 1° de resolución con alcance temporal de H+72. El área continental (azul) tiene una resolución de 0.2° y un alcance temporal de H+48. El área peninsular (roja) tiene una resolución de 0.1° y un alcance temporal de H+24. Para las islas Canarias se han implementado dos configuraciones distintas que producen integraciones en las áreas en verde a resoluciones de 0.1° la mayor, y 0.05° la menor, y cuyo alcance temporal es de H+24 en ambos casos.

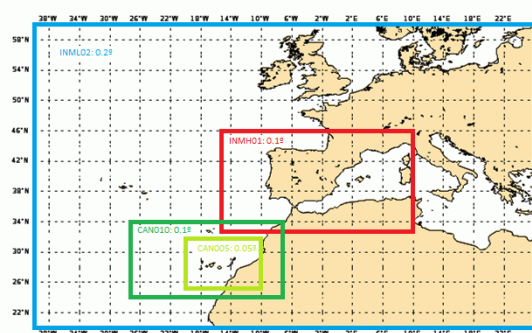


Fig.1- Áreas regionales de integración de MOCAGE-ACCIDENTE en AEMET.

## 2. Necesidades de MOCAGE-ACCIDENTE

En MOCAGE la dinámica está condicionada por los campos meteorológicos, ya sean análisis o predicciones, procedentes de modelos numéricos de predicción del tiempo. Por tanto es necesario disponer de estos campos en las resoluciones y las áreas consideradas. En AEMET varias veces al día se generan los forzamientos meteorológicos

necesarios para poder integrar el modelo en cualquiera de las cinco configuraciones que hemos mencionado. Los forzamientos globales a 1° y 2° son generados dos veces al día a partir de los campos procedentes del modelo IFS del Centro Europeo. Los forzamientos para las áreas continentales y regionales se generan cuatro veces al día y proceden del modelo HIRLAM de AEMET en sus distintas versiones. Los continentales a 0.5° y 0.2° de resolución se generan a partir de los campos del HIRLAM ONR 0.16°, los peninsulares a 0.1° proceden del HIRLAM HNR 0.05° y los forzamientos para las dos áreas de las islas Canarias a 0.1° y 0.05° de resolución, del HIRLAM CNN 0.05°.

Para integrar MOCAGE-ACCIDENTE, además es necesario proporcionar una serie de datos para cada una de las fuentes modelizadas (admite hasta diez). En concreto, se necesitan las coordenadas de la fuente y la altura de emisión, así como la altura alcanzada por el penacho. También se deben especificar los instantes inicial y final, la tasa de emisión en  $\text{gr s}^{-1}$  o  $\text{Bq h}^{-1}$  y la especie emitida.

### 3. Salidas de MOCAGE-ACCIDENTE/AEMET

Las simulaciones realizadas con MOCAGE-ACCIDENTE proporcionan la evolución temporal de las concentraciones del material emitido en los 47 niveles del modelo y su total en columna como la suma de las contribuciones de todos los niveles. Es habitual que en casos de emisión real a la atmósfera se desconozcan las tasas de emisión ya que es difícil estimarlas. En estos casos es frecuente que los modelos de dispersión atmosférica utilicen tasas de emisión ficticias estándar y que las concentraciones resultantes se proporcionen en unidades adimensionales relativas a un cierto valor de referencia. En AEMET este valor de referencia se toma como el máximo valor de concentración encontrado en la primera de las salidas de la ejecución, al cabo de una hora para las configuraciones continentales y regionales y tres horas para ejecuciones en la configuración global. Se trata de una información cualitativa, es decir, se proporciona la forma de la nube generada, pero existe la dificultad de determinar cual es el umbral de concentración que se debe utilizar para delimitarla.

### 4. Aplicaciones de MOCAGE-ACCIDENTE en AEMET

Dos de las aplicaciones más útiles de los modelos de dispersión atmosférica son la simulación de una nube de cenizas procedentes de un volcán en erupción y la de una nube radiactiva generada como

consecuencia de un accidente nuclear. En los últimos años hemos tenido ocasión de integrar MOCAGE-ACCIDENTE en situaciones reales de este tipo: las erupciones de los volcanes islandeses Eyjafjallajökull y Grímsvötn en abril de 2010 y en mayo de 2011 respectivamente, y el accidente en la Central Nuclear de Fukushima en Japón en marzo de 2011 como consecuencia de un terremoto y un posterior tsunami.

Tanto en el caso las erupciones volcánicas como en el de los accidentes nucleares existen unos protocolos de actuación a nivel internacional que los países afectados deben seguir. El principal problema que presentan las erupciones volcánicas es el daño que ocasionan las cenizas en los motores de los aviones y los perjuicios que pueden ocasionar al sector de la aviación y a sus usuarios. La OACI (Organización de Aviación Civil Internacional), por consejo de la OMM (Organización Meteorológica Mundial), ha designado nueve Centros Meteorológicos denominados VAAC (Volcanic Ash Advisory Centres) encargados de la provisión de avisos para las erupciones volcánicas que queden dentro de su zona de responsabilidad. Estos avisos deben detallar la distribución espacial de las cenizas volcánicas basándose en la ejecución de modelos de dispersión y en la vigilancia mediante datos de observación, especialmente de satélite. En el caso de los accidentes nucleares, y en general de emergencias medioambientales, también se han designado ocho Centro Meteorológicos Regionales Especializados (RSMC) encargados de producir retro trayectorias y productos derivados de sus modelos de dispersión y distribuirlos a la IAEA (Agencia Internacional de la Energía Atómica) y a los países potencialmente afectados. Por tanto, en estos dos tipos de situaciones hay unas herramientas oficiales que los Servicios Meteorológicos de estos países deben utilizar.

En AEMET, en los casos de erupciones volcánicas y accidentes nucleares ocurridos en los últimos años se han seguido los protocolos de actuación internacionales pero además se han hecho simulaciones con MOCAGE-ACCIDENTE a petición de distintas instituciones y organismos de la Administración.

#### 4.1. Integración de MOCAGE/AEMET para simular la dispersión de cenizas durante la erupción del volcán islandés Eyjafjallajökull (14/04/2010 a 23/05/2011)

Durante el periodo que duró la erupción se ejecutó diariamente el modelo para obtener predicciones de la evolución de la nube de cenizas que pudieran ser utilizadas por los predictores de AEMET como herramienta complementaria a la herramienta oficial proporcionada por el VAAC de Londres (Met

Office), centro responsable de la zona en la que se encuentra el volcán islandés. En todo momento se mantuvo contacto con este centro y se usaron los datos de emisión que nos proporcionaron.

Al finalizar la erupción se integró MOCAGE-ACCIDENTE/AEMET durante el episodio completo en un único dominio global a 2° de resolución y con datos meteorológicos y de emisión más actualizados. Las alturas de emisión fueron estimadas mediante radar por el IMO (Servicio Meteorológico Islandés) y las tasas de emisión (figura 2) se calcularon a partir de una relación empírica en función de la altura de emisión que el propio Met Office desarrolló durante el evento para ser incluida en su modelo de dispersión NAME:

$$E=14.7 \times 10^{-6} [H(Km)]^{1/0.225}$$

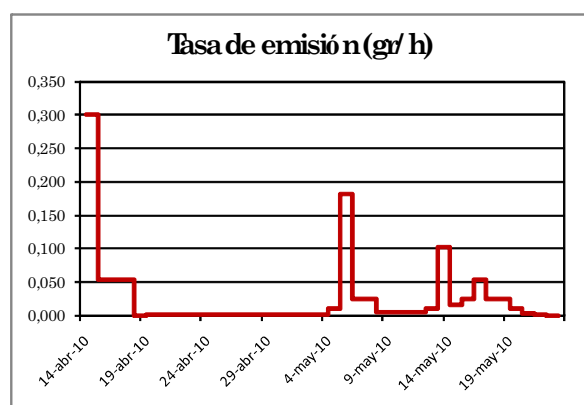


Fig 2.- Tasa de emisión (gr/h) para el volcán Eyjafjallajökull en función de la altura de emisión según relación empírica desarrollada por el Met Office.

El proceso eruptivo tuvo dos episodios más explosivos en los que el penacho alcanzó alturas de 10km o mayores. El primero tuvo lugar el día 14 de abril de 2010 cuando se inició la erupción. Tras un periodo de latencia se produjo una reactivación el día 5 de mayo. Otra de menor intensidad tuvo lugar el día 14 de mayo fecha a partir de la cual el volcán se fue apagando lentamente hasta la extinción el día 24 de mayo.

Con el objetivo de verificar el buen funcionamiento del modelo, se analizaron las observaciones disponibles de las redes radiométricas y de contaminación de fondo (red EMEP/VAG/CAMP) operadas por AEMET y las diferentes fuentes de observación de satélite. También se analizó la información procedente de otros modelos y de la red de lidar europea EARLINET (European Aerosol Research Lidar Network) para el estudio de aerosoles, que estuvo informando al VAAC de Londres diariamente sobre la observación de cenizas y emitiendo informes cada cierto tiempo.

En la figura 3 se muestra la simulación hecha por MOCAGE/AEMET durante los primeros días de la erupción, días 15/04/2010 (06 y 18 UTC) y 16/04/2010 (06 UTC). A los mapas se han superpuesto las localizaciones de las estaciones lidar de la red EARLINET, que se representan como triángulos negros. Para poder manejar la información obtenida a partir de los informes se ha dividido el día en dos periodos, mañana y tarde. Los puntos rojos representan las estaciones que informaron de haber detectado presencia de cenizas **por primera vez** en uno de estos periodos: periodo de mañana superpuesto a los mapas de las 6 y periodo de tarde superpuesto al mapa de las 18 UTC. El objetivo de esta comparación es la comprobación de que el modelo recoge bien el avance del frente de la nube de cenizas.

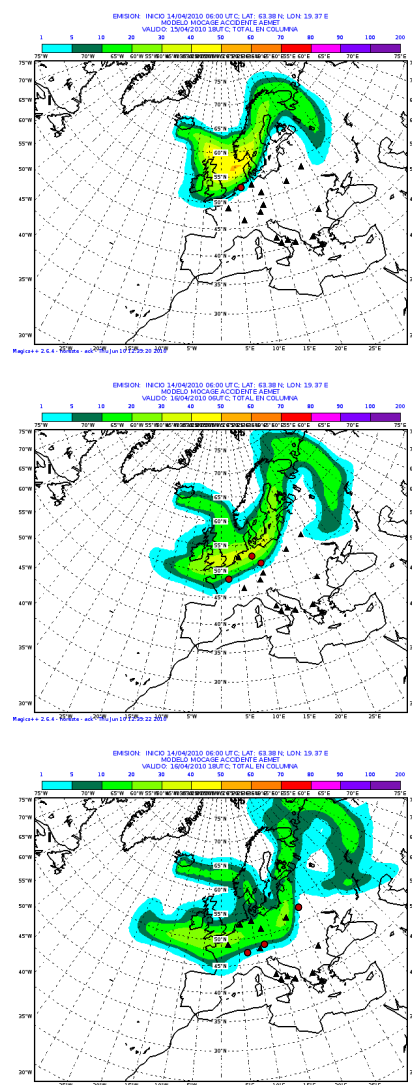


Fig.3 Avance del frente de cenizas al inicio de la erupción desde el noroeste hacia el sureste de Europa según MOCAGE-ACCIDENTE/AEMET y según las observaciones procedentes de las estaciones lidar de EARLINET.

A continuación presentamos otros dos ejemplos comparativos de las simulaciones con MOCAGE-ACCIDENTE/AEMET para el segundo episodio explosivo a partir de la tarde del 05/05/2010, durante el cual, se dio la circunstancia de que la situación sinóptica favoreció la llegada de cenizas a la península Ibérica y a las islas Canarias. En la figura 4 se muestra una comparación de las concentraciones encontradas por MOCAGE y las encontradas por el modelo NAME para el día 10 de mayo de 2011 a las 12 UTC. El área roja del producto NAME representa concentraciones por encima de  $200 \text{ ug m}^{-3}$  y la negra, por encima de  $2000 \text{ ug m}^{-3}$ . La escala de colores del producto MOCAGE representa concentraciones en términos porcentuales respecto al valor de referencia al inicio de la simulación al cual corresponde el valor 100. A pesar de estas y otras muchas diferencias entre los dos modelos y sus representaciones gráficas, se aprecia que la forma de la nube y su extensión horizontal son muy similares.

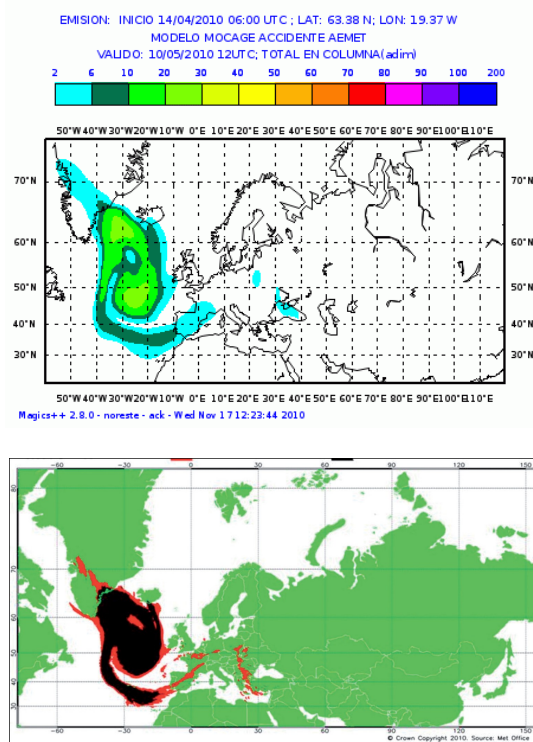


Fig.4.- Comparación entre las salidas de MOCAGE-ACCIDENTE/AEMET y NAME para el día 10/05/2010 a las 12 UTC.

La comparación entre las observaciones de satélite y la forma de la nube de cenizas estimada por MOCAGE-ACCIDENTE estuvieron también en general en buen acuerdo. En la figura 5 se muestra una comparación entre el producto SO<sub>2</sub> de GOME-2 a bordo de MetOp y los resultados de la simulación de MOCAGE para el total en columna del día 7 de mayo a las 12 UTC. También en este caso se aprecia

una gran coincidencia entre las dos imágenes teniendo en cuenta que la erupción se había reactivado tras un periodo de escasa actividad el día 5 sobre las 18:00 UTC y que el SO<sub>2</sub> acompaña a las cenizas volcánicas en la fase inicial de una erupción volcánica. Cabe destacar como capta el modelo la entrada de cenizas por el suroeste peninsular.

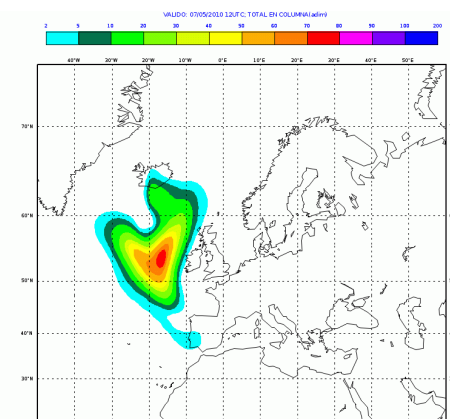
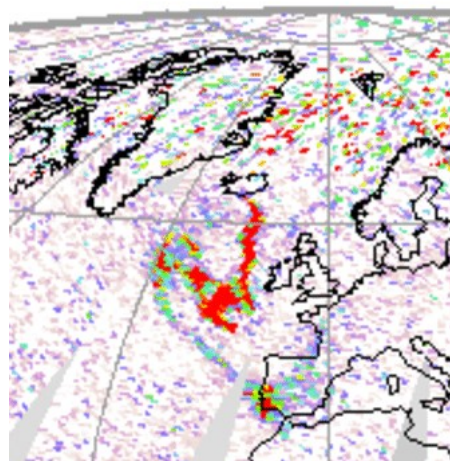


Figura 5.2.3 - nombre: ash - fecha: 2010.05.07



O3MSAF/DLR GOME-2 SO2

Fig.5.- Comparación entre la salida de MOCAGE-ACCIDENTE (total en columna) y el producto de SO<sub>2</sub> de GOME2 para el día 07/05/2010.

#### 4.2. Integración de MOCAGE/AEMET para simular la evolución de la nube radiactiva generada en el accidente nuclear de Fukushima (14 de marzo de 2011)

A instancias del Consejo de Seguridad Nuclear se proporcionaron predicciones diarias hasta H+72 de MOCAGE-ACCIDENTE durante todo el episodio. El modelo se ejecutó en un único dominio global a 1° de resolución con los datos de emisión proporcionados por el Met Office: emisión continua desde el inicio de la erupción, considerada el día 14 a las 15 UTC, hasta el final del evento, con una tasa



de emisión de  $10^{15}$  Bq  $h^{-1}$  y altura del penacho entre 0 y 500m. En este caso tenemos que destacar la falta

de observaciones disponibles y de información respecto a las emisiones. No se mantuvo contacto alguno con los centros designados (Tokio, Beijing y Obninsk) por la lejanía del accidente con respecto a nuestro país.

No obstante, al finalizar el episodio, se repitió la integración con información meteorológica más actualizada y se pudo comparar con las observaciones procedentes de la red de radionucleidos de la organización CTBTO (Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization) como mostramos en la figura 6. A los mapas de superficie de las 12 UTC de MOCAGE-ACCIDENTE se han superpuesto las localizaciones de las estaciones de la red CTBTO del hemisferio norte representadas por puntos rojos. En amarillo aparecen las estaciones que en la fecha de validez del mapa correspondiente detectaron actividad, con independencia de la hora a la que lo hicieron.

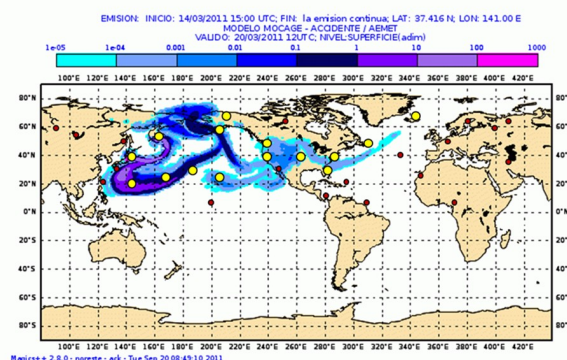
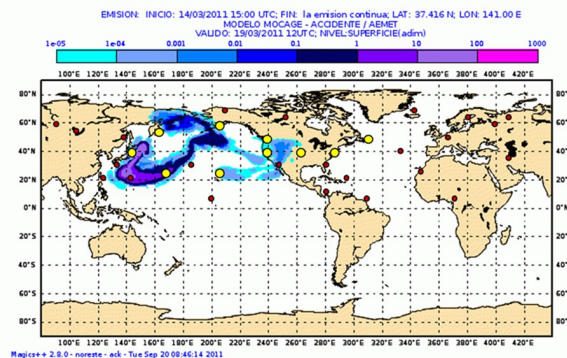
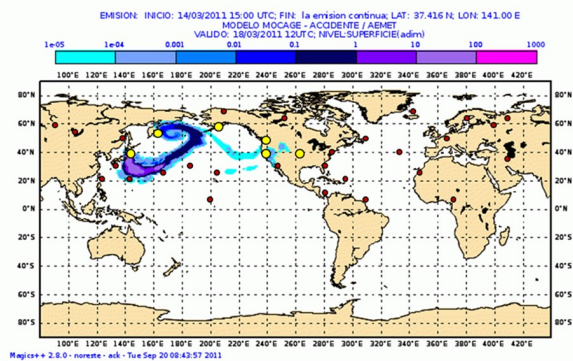
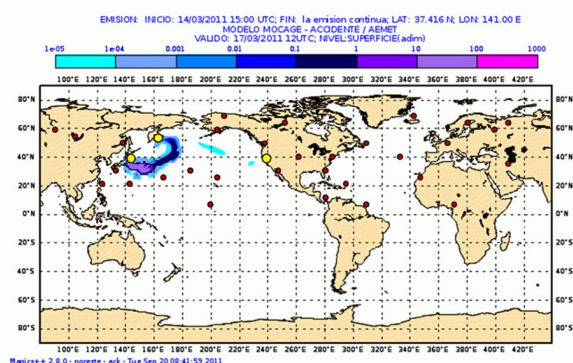


Fig.6.- Comparación de MOCAGE/AEMET en modo ACCIDENTE con observaciones de la red de radionucleidos de la CTBTO.

## 5. Otras aplicaciones de MOCAGE/AEMET en modo ACCIDENTE

En AEMET, MOCAGE-ACCIDENTE no sólo se utiliza para simular situaciones de emisión real a la atmósfera. Con fines preventivos, también se utiliza para evaluar situaciones de emisiones posibles que no han llegado a producirse. Es el caso de las integraciones diarias que se hacen con hora inicial de la emisión a las 0 UTC y alcance de la predicción hasta H+24 para simular la dispersión en cada una de las centrales nucleares españolas.

También, durante la crisis volcánica de la isla de El Hierro, a petición de una serie de organismos entre los que se encontraban la Dirección General de Protección Civil y el Instituto Geográfico Nacional, se hicieron predicciones diarias para simular la dispersión de una posible emisión de cenizas a la atmósfera. Se consideró que la emisión comenzaba a las 0 UTC y tres posibles escenarios con alturas del penacho desde la superficie del mar hasta 500, 1500 y 3000 m. Las integraciones se hacían, además, con tres configuraciones distintas, en los dominios regionales para las Islas Canarias a 0.1° y 0.05° de resolución con alcance de la predicción de H+24, y

en el dominio regional a 0.2° de resolución con alcance de la predicción de H+36. Esta última configuración incluye la península Ibérica y la mayor parte del continente europeo. En la figura 7 se muestra un ejemplo de estas simulaciones.

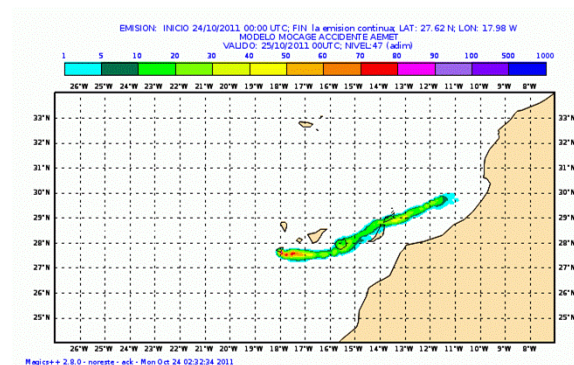


Fig.7.- MOCAGE-ACCIDENTE/AEMET. Predicción hasta H+24 de la dispersión de cenizas en superficie procedentes de una posible erupción subaérea del volcán de la Isla de el Hierro con emisión el día 24/10/2011 a las 0 UTC.

## Referencias

- “The new products and services being produced by VAAC London as a result of the experiences in leading with the Eyjafjallajökull volcanic eruption”, ICAO IVAFT meeting, July 2010.
- Witham et al., 2007 “Comparison of VAAC atmospheric dispersion models using the 1 November 2004 Grimsvötn eruption”. Meteorol. Appl. 14, 27-38.
- Josse et al, 2004: Rn-222 global simulations with the multiscale CTM MOCAGE, Tellus 56B, 339-356.
- “Monitoring volcanic ash from space” ESA-EUMETSAT workshop on the 14 April 23 May 2010 eruption at the Eyjafjöll volcano. 2010. Editor C. Zehner.
- “Overview of the Name Model and its Application to the Eyjafjallajökull Eruption” (Version 6, UK Met Office 23/04/2010).
- Informe con fecha 10/05/2010 de la red EARLINET para el VAAC de Londres durante la erupción del Eyjafjallajökull: [http://www.earlinet.org/typo3conf/ext/naw\\_securedl/secure.php?u=0&file=uploads/media/EyjafjallajokulEruption\\_EARLINET\\_22May2010.pdf&t=1339750704&hash=f674c48416eacc88121b623e4655808](http://www.earlinet.org/typo3conf/ext/naw_securedl/secure.php?u=0&file=uploads/media/EyjafjallajokulEruption_EARLINET_22May2010.pdf&t=1339750704&hash=f674c48416eacc88121b623e4655808)